



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas



ANA CAROLINA FARIA OLIVEIRA MORAIS

**ESTUDO DAS PERDAS OPERACIONAIS DOS SISTEMAS DE CARREGAMENTO
E TRANSPORTE EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

OURO PRETO
2019



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas



ANA CAROLINA FARIA OLIVEIRA MORAIS

ESTUDO DAS PERDAS OPERACIONAIS DOS SISTEMAS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE EM UMA MINA A CÉU ABERTO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Coorientador: Eng. Maria Clara Martins

OURO PRETO
2019



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas



M827e **Morais, Ana Carolina Faria Oliveira .**
Estudo das perdas operacionais dos sistemas de carregamento e transporte em uma mina a céu aberto [manuscrito] / Ana Carolina Faria Oliveira
Morais. - 2019.

51f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Mineração a céu aberto. 2. Minas e mineração - Carregamento e transporte. 3. Lavra de minas. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.6

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

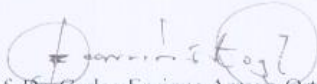
Aos 25 dias do mês de junho de 2019, às 16h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“ESTUDO DAS PERDAS OPERACIONAIS DOS SISTEMAS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE EM UMA MINA A CÉU ABERTO”**, pela aluna **Ana Carolina Faria Oliveira Morais**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (orientador)**, **M.Sc. Walter Schmidt Felsch Júnior e Eng.ª de Minas Maria Clara Martins**.

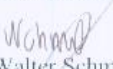
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela Aprovada da candidata, com a nota 8,5, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.


A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

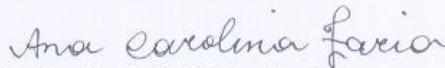
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

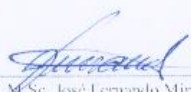
Ouro Preto, 25 de junho de 2019.


Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador


M.Sc. Walter Schmidt Felsch Júnior
Membro da Comissão Avaliadora


Eng.ª de Minas Maria Clara Martins
Membro da Comissão Avaliadora


Ana Carolina Faria Oliveira Morais


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas



“ESTUDO DAS PERDAS OPERACIONAIS DOS SISTEMAS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE EM UMA MINA A CÉU ABERTO”

ANA CAROLINA FARIA OLIVEIRA MORAIS

Monografia apresentada em sessão pública em 25 de junho de 2019 como requisito parcial para obtenção de grau em Engenharia de Minas pela Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto e aprovada pela banca examinadora composta pelos seguintes membros

Prof. Dr. Carlos E Arroyo Ortiz (Orientador)

Eng. Maria Clara Martins (Coorientador)

MSc. Walter Schmidt – Eng. CSN (Membro)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar meus caminhos e me ajudar a vencer os desafios da vida.

Aos meus pais, Rita e Einstein, meu irmão Pedro, meus avós Cândida e Joaquim e meu tio Quinzinho por todo carinho e apoio necessários para que eu vencesse mais essa etapa.

À Universidade Federal de Ouro Preto, Fundação Gorceix e aos professores que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal.

Ao professor Carlos Arroyo, por todo o conhecimento compartilhado, incentivo e orientação.

À Maria Clara e André pela ajuda na elaboração deste trabalho.

A todos que me ajudaram e participaram desses meus anos de graduação e que contribuíram para a conclusão desse ciclo.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Etapas do processo operacional em uma mina a céu aberto.....	3
Figura 2: Ciclo de carregamento e transporte.	3
Figura 3: Escavadeira carregando um caminhão fora de estrada.	6
Figura 4: Equipamentos de carregamento.	6
Figura 5: Equipamentos de transporte.	7
Figura 6: Caminhão em fila esperando para ser carregado.	9
Figura 7: Layout das rotas e topografia no DSIm.	17
Figura 8: Metodologia do trabalho.....	18
Figura 9: Fluxo de criação de um modelo no DSIm.....	20
Figura 10: Comparação da ociosidade dos equipamentos de carga no cenário base e no cenário I.....	27
Figura 11: Horas de atividade dos equipamentos de carga do cenário III com MTBF e MTTR reais.....	29
Figura 12: Horas de atividade dos equipamentos de carga do cenário III com MTBF e MTTR teóricos.....	29
Figura 13: Movimentação por equipamento de carga do cenário III comparando o MTBF e MTTR reais e teóricos.	30
Figura 14: Horas de atividade dos caminhões com MTBF e MTTR reais.	31
Figura 15: Horas de atividade de caminhões com MTBF e MTTR teóricos.	31
Figura 16: Comparação da produtividade horária no cenário III utilizando o MTBF e MTTR reais e teóricos.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações da frota de transporte.	22
Tabela 2: Especificações da frota de carga.....	23
Tabela 3: Distribuição de probabilidade das frotas de transporte.....	23
Tabela 4: Comparação do cenário base usando o MTBF e MTTR teórico e real.....	25
Tabela 5: Comparação entre o cenário base e o cenário I.....	26
Tabela 6: Comparação entre o MTBF e MTTR teórico e real no cenário III.....	28

ABREVIATURAS

- DF – Disponibilidade Física
- DMT – Distância Média de Transporte
- DSIM – Delphos Open Pit simulator
- MTBR – Tempo Médio Entre falhas
- MTTR – Tempo Médio de Reparo
- PO – Pesquisa Operacional
- PDE – Pilha de Estéril
- RO – Rendimento Operacional
- UF – Utilização Física

RESUMO

Em uma mina é muito importante que todas as etapas do processo sejam realizadas de forma eficaz, pois dessa forma são garantidas a produtividade e viabilidade do empreendimento mineiro. Em específico, as operações de carregamento e transporte e seus indicadores de desempenho possuem um papel fundamental no processo de lavra de minas.

O objetivo do estudo foi analisar através de simulação as horas ociosas dos equipamentos de carga e o impacto desta hora improdutiva em uma mina a céu aberto. Além disso, são abordadas as variações do MTBF e MTTR real e teórico, a velocidade global do sistema e as variações nos distintos cenários simulados diminuindo-se o número de equipamentos de carga e/ou transporte.

Os dados utilizados na simulação são de uma mina de minério de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero, região central do estado de Minas Gerais, Brasil, em 24 horas de operação.

Palavras-chave: mina a céu aberto, horas ociosas, MTBF e MTTR, carregamento e transporte

ABSTRACT

In a mine, it is very important that all stages of the process are carried out effectively, as this guarantees the productivity and viability of the mining operation. The loading and transport operations have a direct impact on performance indicators and play a key role in the mining process.

The goal of the study was to analyze by the idle hours of the load equipment and the impact of this unproductive time in an open pit mine. In addition, the real and theoretical MTBF and MTTR variations, the global speed of the system and the variations in the different simulated scenarios, reducing the number of load and / or transport equipment.

The data used in the simulation are from an iron ore mine located in the Quadrilátero Ferrífero, central region of the state of Minas Gerais, Brazil, on a day of operation.

Key-words: open pit mine; idle hours; MTBF and MTTR; loading and transportation.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.2.	EQUIPAMENTOS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE	4
2.3.	TEMPOS DE CICLO	8
2.4.	PRODUTIVIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE	9
2.4.1.	Cálculo da produtividade: Equipamentos de carga.....	10
2.4.2.	Cálculo da produtividade: Equipamentos de transporte	11
2.5.	SISTEMA DE DESPACHO	12
2.6.	SIMULAÇÃO	14
2.6.1.	Simulação a eventos discretos	15
2.6.2.	Simulação na indústria mineral.....	15
2.6.3.	Delphos Open Pit Simulator®.....	16
3.	METODOLOGIA	17
3.1.	LEVANTAMENTO DOS DADOS	18
3.2.	TRATAMENTO DOS DADOS	18
3.3.	CONSTRUÇÃO DO MODELO.....	19
3.4.	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	21
3.5.	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS	21
4.	ESTUDO DE CASO	22
4.1.	GENERALIDADES: CARACTERÍSTICAS DA MINA EM ESTUDO	22
4.2.	MODELAGEM DOS DADOS	22
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
6.	CONCLUSÕES	33
	REFERÊNCIAS.....	34
	ANEXOS	36

1. INTRODUÇÃO

Os indicadores operacionais (DF, UF, RO, produtividade, velocidade, MTBF, MTTR e DMT) e as horas improdutivas (tempo em fila, lanche, troca de turno, abastecimento e ociosidade) são fundamentais para o controle e desenvolvimento das operações mineiras, sendo a representação do passado histórico, do presente e do futuro da mina.

Atualmente, grande parte das empresas da indústria mineral se baseiam na experiência dos profissionais e em dados históricos para as tomadas de decisão, muitas vezes sem um estudo prévio concreto, devido a necessidade de rapidez e dinamicidade do processo. O estudo de caso realizado neste trabalho exemplifica a situação descrita anteriormente, em que muitas vezes se utiliza um maior número de máquinas de carga desnecessariamente, aumentando a ociosidade das mesmas, visando cumprir as demandas de produção sem grandes desafios.

Dentro da indústria mineral a simulação é uma excelente ferramenta para auxiliar as tomadas de decisão e analisar o comportamento dos indicadores operacionais, nos mais diversos cenários. Entretanto, observa-se que a utilização da simulação na prática ainda é emergente.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Geral

O objetivo do presente estudo é avaliar, via simulação por eventos discretos, as operações de carregamento e transporte assim como a variação de cenários e consequentemente análises para a tomada decisões em uma mina de minério de ferro a céu aberto.

1.1.2. Específicos

- Gerar um modelo que represente a realidade e a massa movimentada;
- Estimar as perdas e ganhos quando se diminuir a ociosidade dos equipamentos de carga;
- Avaliar o impacto que o MTBF e MTTR real e teórico tem no sistema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MINA A CÉU ABERTO: OPERAÇÕES DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE

De acordo com SOUZA (2001), a mineração a céu aberto prioriza a movimentação de grandes volumes de rocha a baixo custo unitário, e para isso são utilizados equipamentos de carregamento e transporte de grande porte.

Em uma mina a céu aberto geralmente realizam-se as seguintes operações unitárias: perfuração e desmonte, quando o material a ser escavado necessita ser fragmentado com explosivos, carregamento e transporte.

“As operações de carregamento e transporte são as mais críticas e complexas etapas dentro dos processos de lavra de uma mina a céu aberto, já que representam aproximadamente 60% do OPEX (*operational expenditure* - custos decorrentes do processo produtivo), sendo, portanto, essencial o uso de instrumentos de avaliação e controle de seu comportamento.” (QUEVEDO, 2009)

O material transportado da frente de lavra de minério vai para a planta de beneficiamento ou segue para a pilha de produto, dependendo das especificações de teor requeridas. No caso das frentes de lavra de estéril, o transporte é feito até os depósitos ou forragens de estrada. Tais operações seguem as premissas vindas do planejamento e do controle de qualidade da mina e utilizam o sistema de despacho para otimizar e controlar os equipamentos. A figura 1 representa de forma geral as etapas do processo operacional de uma mina a céu aberto.

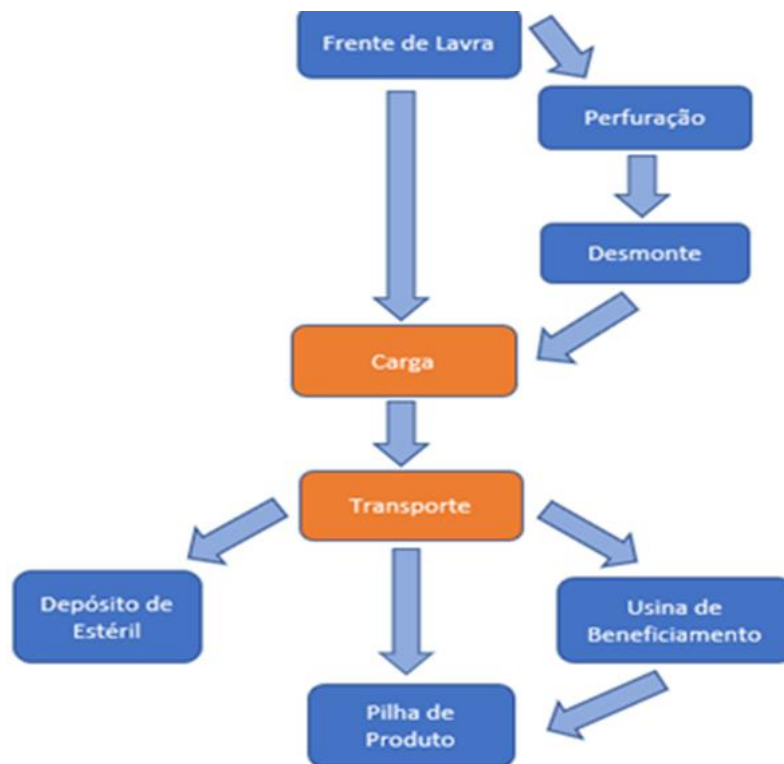


Figura 1: Etapas do processo operacional em uma mina a céu aberto.
 Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

O equipamento de carga a ser utilizado pode ser uma carregadeira ou escavadeira e sua função é retirar o minério ou estéril da frente de lavra e carregar o equipamento de transporte, geralmente, caminhões. Como exemplificado na figura 2, o processo de carregamento e transporte é feito de forma contínua: assim que o caminhão bascula sua carga ele segue uma rota para ser carregado novamente.

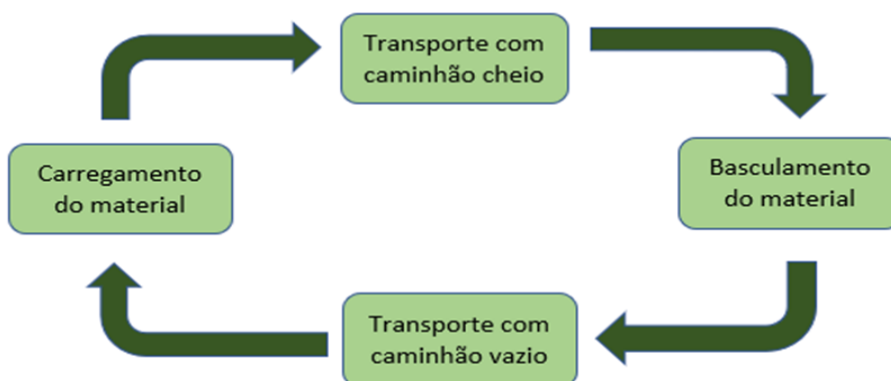


Figura 2: Ciclo de carregamento e transporte.
 Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

“O transporte de material de uma frente de lavra até um determinado ponto de descarga deve considerar uma série de rotas disponíveis, e a geração de filas tanto no ponto de carga como de descarga dependerão da capacidade do caminhão e do tipo de equipamento que irá carregar, descarregar ou receber o material. É normal que se formem filas nas frentes em que estão alocados os equipamentos de carga, onde os caminhões precisam esperar um determinado tempo para poderem ser carregados, o que gera tempos ociosos e diminuição da produção.” (QUEVEDO, 2009)

Os indicadores operacionais, como DF, UF, RO, velocidade, carga média, tempo médio entre falhas dos equipamentos (MTBF) e tempo médio de reparo dos equipamentos (MTTR) também impactam diretamente na produtividade e serão abordados neste estudo.

2.2. EQUIPAMENTOS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE

Como dito anteriormente os equipamentos de carga comumente usados em uma mina a céu aberto são as carregadeiras e escavadeiras e os equipamentos de transporte são os caminhões, possuindo capacidades e portes variados para atender ao dimensionamento de equipamentos e o volume de material a ser retirado da mina.

É muito importante que haja compatibilidade entre os equipamentos de carga e transporte, pois desta forma é possível maximizar a produtividade e eficiência de ambos. SOUZA (2001) exemplifica que se uma escavadeira der uma caçambada parcialmente cheia para encher o caminhão, sua eficiência é reduzida e se o caminhão partir com menos carga que a sua capacidade total de transporte, a produtividade do caminhão será afetada.

“Um dimensionamento preciso da frota de equipamentos de lavra reveste-se de grande importância, uma vez que os custos envolvidos, quer de capital, quer de operação, representam, quase sempre, uma parcela considerável dos custos de uma mina.” (SILVA, 2011).

Segundo PINTO (1999) apud QUEVEDO (2009), para a escolha do tipo e o dimensionamento dos equipamentos devem-se levar em consideração diferentes fatores, como a escala de produção, capacidade financeira do grupo minerador, características da mina testando-se as diversas alternativas disponíveis. Na Figura 3 se observa equipamentos compatíveis de carregamento e transporte.

Para SILVA (2011) a compatibilização dos equipamentos em operação conjugada deve, então, atender a outros fatores que irão afetar diretamente a eficiência da operação, como o número de passes do equipamento de carregamento para encher o equipamento de transporte. Considera-se que de 3 a 5 passes (caçambadas) representam um bom equilíbrio. Um número menor seria preferível, contando que:

- O tamanho da caçamba da unidade de transporte não seja muito pequeno em comparação com o tamanho da caçamba da unidade de carregamento, resultando em impactos sobre a suspensão e a estrutura do veículo e derramamento excessivo da carga;
- O tempo de carregamento não seja tão curto que ocasione a demora da chegada da unidade de transporte seguinte, ocasionando um tempo excessivo de espera por parte da unidade de carregamento;
- O número de unidades de transporte para cada unidade de carregamento. Se este número for muito pequeno poderá ocorrer ociosidade da unidade de carregamento; se o contrário, é provável que ocorram filas dos equipamentos de transporte;
- O número excessivo de unidades da frota, ocasionando dificuldades de tráfego, manutenção etc.



**Figura 3: Escavadeira carregando um caminhão fora de estrada.
Fonte: Acervo pessoal, 2019.**

Os equipamentos mais utilizados em minas a céu aberto para as operações de escavação e carregamento são escavadeiras a cabo e hidráulicas, retroescavadeiras, carregadeiras sobre pneus ou esteira, moto scrapers, dragas e monitores hidráulicos (RICARDO & CATALANI, 2007). A figura 4 apresenta exemplos dos equipamentos de carregamento citados.



**Figura 4: Equipamentos de carregamento.
I- Pá carregadeira; II- Escavadeira hidráulica; III- Escavadeira a cabo; IV- Retroescavadeira.
Fonte: Caterpillar, 2019.**

Os caminhões fora de estrada são os equipamentos de transporte mais utilizados na mineração a céu aberto, pois segundo SOUZA (2001) oferecem maior grau de flexibilidade num sistema de transporte e são especialmente indicados quando estão disponíveis vários minérios e fontes de minério (frentes de lavra).

Dependendo das necessidades da mina podem ser usados os caminhões fora de estrada de maior porte ou os caminhões rodoviários de menor porte (figura 5), no mercado existem vários modelos e fabricantes de caminhões fora de estrada variando de 90 toneladas a 400 toneladas.



Figura 5: Equipamentos de transporte.
I - Caminhão de grande porte; II- Caminhão rodoviário.
Fonte: I- Caterpillar, 2019; II- Scânia, 2019.

A evolução da capacidade dos caminhões está sendo favorecida pelo desenvolvimento tecnológico de certos componentes que interferem na sua fabricação e na necessidade de aumentar a produtividade e diminuir os custos nos grandes projetos de mineração e obras civis (JIMENO, 2014).

2.3. TEMPOS DE CICLO

Segundo SILVA (2011) tempo de ciclo é o intervalo de tempo decorrido entre duas passagens consecutivas do equipamento por qualquer ponto do ciclo, e tempos elementares, a duração de cada movimento elementar. O ciclo produtivo pode ser dividido em seis componentes: carregamento, transporte, descarga, retorno, posicionamento e atraso.

No caso de equipamentos de carregamento, o ciclo compreende o tempo total de enchimento da caçamba, posicionamento para descarga e posicionamento para o enchimento da caçamba. No caso de equipamentos de transporte, o ciclo compreende os tempos de carregamento, viagem carregado, manobra, descarga, retorno vazio e posicionamento para carregamento.

De acordo com o SILVA (2011) os ciclos básicos de alguns equipamentos são definidos por:

- Carregadeiras: avanço até a frente, carga da caçamba, manobra, avanço até o veículo, descarga, retorno vazio e manobra;
- Escavadeiras: carga da caçamba, giro carregado, descarga e giro vazio;
- Caminhões: tempo de carga da unidade, tempo de transporte carregado, tempo de manobra e descarga, tempo de retorno vazio, tempo de posicionamento para carga.

De acordo com RICARDO & CATALANI (2007) entre os tempos fixos temos os tempos de carga, descarga e manobras, por serem constantes, independentemente das distâncias percorridas, num grande número de ciclos repetidos. Os tempos variáveis são tempos de transporte carregado ou vazio (retorno), que dependem essencialmente das distâncias percorridas.

Ainda segundo RICARDO & CATALANI (2007):

- Tempo de ciclo mínimo é a somatória dos tempos elementares, ou seja, os tempos fixos mais ou tempos variáveis;
- Tempo de ciclo efetivo é o tempo de ciclo mínimo mais os tempos de parada, que ocorrem necessariamente no decurso de muitos ciclos.

Qualquer movimento elementar como escavação, descarga, transporte, etc., que não seja executado dentro de tempos considerados mínimos, ou seja, com velocidades menores do que as consideradas ideais, significará uma pequena perda de tempo que poderia ser evitada, correspondendo a um pequeno tempo parasita. Desde que os movimentos elementares sejam efetivamente executados com os tempos elementares mínimos, o tempo de ciclo será mínimo, resultando em produção máxima.



Figura 6: Caminhão em fila esperando para ser carregado.
Fonte: Acervo pessoal, 2019.

2.4. PRODUTIVIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE

Segundo SILVA (2011) a produtividade das frotas de carregamento e transporte, na mineração a céu aberto, depende de que o projeto e o planejamento de lavra sejam adequados à jazida e de que os equipamentos selecionados estejam ajustados às demais operações unitárias de lavra e beneficiamento. Assim, o tipo, o número de equipamentos a serem utilizados e a produtividade dependem de:

- Tamanho de valor das jazidas: vida da mina, taxa de produção, método de lavra;
- Projeto de cava: altura das bancadas, largura das frentes de trabalho, desnível entre as frentes de lavra e o destino dos caminhões;
- Tipos de rocha: características do minério e do estéril, como densidade “insitu”, empolamento, umidade, resistência à escavação, grau de fragmentação;

- Projeto da deposição do estéril: local da deposição, forma de disposição do estéril;
- Projetos das estradas: largura das estradas (recomenda-se uma largura mínima de pista igual a 3,5 vezes a largura do caminhão, o que deixa uma faixa igual a 0,5 de largura entre os veículos que se cruzam e nas laterais. Caso a faixa seja estreita o motorista se sentirá inseguro e reduzirá a velocidade ao se aproximar um veículo em sentido contrário), inclinação das rampas de acesso, raio das curvas, superfície de rolamento;
- Planejamento de lavra: número de frentes simultâneas, relação estéril/minério, frequência de deslocamento das frentes de lavra;
- Destino do minério: tipo, dimensões e taxa de produção do equipamento que receberá o minério do caminhão, tais como britadores, silos, pilha para lixiviação etc.;
- Infraestrutura de apoio: recursos de manutenção, recursos para abastecimento, comunicações etc.;
- Equipamentos de apoio: manutenção das estradas e frentes de lavra, desmonte de minério e do estéril.

2.4.1. Cálculo da produtividade: Equipamentos de carga

Segundo RICARDO & CATALANI (2007) uma expressão que indica a produção de um equipamento de carga é a descrita na equação 1:

$$PC = \frac{C \times FE}{TC_{min} \times E} \quad \text{eq. 1}$$

Onde:

PC = Produção efetiva do equipamento de carga;

C = Capacidade da caçamba, em volume solto;

FE = Fator de empolamento do material;

TCmin = Tempo de ciclo mínimo;

E = Coeficiente de rendimento da operação ou fator de eficiência (E = tempo de ciclo mínimo/ tempo de ciclo efetivo).

Outra forma de calcular a produtividade seria pela equação 2 onde observa-se a relação entre a ociosidade do equipamento de carga e as horas de atraso operacional com a produtividade de carga.

$$PC = \frac{CM}{(TC+TM+HAO+OC)\times 60} \quad \text{eq. 2}$$

Onde:

PC= Produtividade horária dos equipamentos de carregamento (t/h);

CM= Carga média (t);

TC= Tempo de carregamento (min);

TM= Tempo de manobra (min);

HAO= Horas de atraso operacional de carga (min);

OC= Ociosidade (min).

2.4.2. Cálculo da produtividade: Equipamentos de transporte

Seguindo o mesmo raciocínio, tem-se a equação 3, usada para calcular a produtividade dos equipamentos de transporte. Observa-se que na parcela dos tempos variáveis (TV) tem-se a velocidade dos equipamentos de transporte e as distâncias percorridas, já nos tempos fixos (TF) tem-se os tempos de fila, manobra e carregamento.

$$PT = \frac{CM}{(TF+TV+HAO)\times 60} \quad \text{eq. 3}$$

Onde:

PT= Produtividade horária dos equipamentos de transporte (t/h);

CM= Carga média (t);

TV= Tempos variáveis (min);

TF= Tempo fixos (min);

HAO= Horas de atraso operacional de transporte (min).

Sendo que:

$$TF = FC + TM + TC + FB + TB \quad \text{eq. 4}$$

Onde:

FC= Tempo de fila para carregamento (min);

TM= Tempo de manobra do equipamento de transporte (min);

TC= Tempo de carregamento (min);

FB= Tempo de fila para basculamento (min);

TB= Tempo de basculamento (min).

$$TV = \left(\frac{DMT}{velC} + \frac{DMT}{velV} \right) \times \frac{KmC}{KmV} \times 60 \quad \text{eq. 5}$$

DMT= Distância média de transporte (km);

VelC= Média de velocidade do caminhão cheio (km/h);

VelV= Média de velocidade do caminhão vazio (km/h);

KmC= Quilômetros percorridos com caminhão cheio (km);

KmV= Quilômetros percorridos com caminhão vazio (km).

De acordo com CETIN (2004) apud QUEVEDO (2009) é importante que seja considerado que equipamentos de transporte são produtivos quando estão transportando material, portanto os tempos em fila e ociosidade dos equipamentos são a maior fonte de não produtividade.

2.5. SISTEMA DE DESPACHO

De acordo com QUEVEDO (2009) para obter o melhor resultado na operação de mina, necessita-se que o despacho tome decisões corretas para os caminhões que transportam minério ou estéril das frentes de lavra até o determinado destino, levando em consideração a maximização da produção, minimizar filas nos pontos de carga e descarga, além de respeitar as metas de qualidade.

“Minas a céu aberto utilizam dois critérios para a alocação de caminhões: alocação estática e dinâmica. Na alocação estática, os caminhões são alocados a um ponto de carga e a um ponto de descarga, ou seja, o seu deslocamento ocorre apenas entre esses dois pontos durante um determinado período de tempo. Na alocação dinâmica, a cada carga e/ou

descarga, o caminhão é direcionado para um ponto específico, de acordo com critérios previamente estabelecidos.” (RODRIGUES, 2006).

“Na alocação dinâmica um caminhão pode ser alocado a novos pontos de carga e basculamento de forma a prevenir a formação de filas e aumentar a produtividade da frota.” (COSTA, 2005).

O despacho computadorizado é uma ferramenta utilizada na maioria das minas atualmente, devido a necessidade de rapidez e assertividade nas tomadas de decisão no dia a dia. Dependendo do número de equipamentos envolvidos é quase que impossível fazer o cálculo para a alocação correta dos caminhões manualmente. Uma outra função do sistema de despacho é dizer quantos equipamentos são necessários para a realização das operações, evitando que ocorra um excesso de equipamentos no sistema causando um aumento de filas e ociosidade.

“O objetivo do despacho computadorizado é maximizar o tempo total produtivo da mina, minimizar a quantidade de caminhões necessária para o transporte, maximizar a produção dos equipamentos de carga e atender os padrões de qualidade da usina de tratamento.” (RODRIGUES, 2006).

A primeira ferramenta de expedição da mineração baseada em computador foi o sistema de gerenciamento de frotas *Dispatch*. Criado há 40 anos pela MODULAR Mining, é atualmente, o sistema de despacho mais confiável no setor da mineração. Segundo a MODULAR MINING (2019), o sistema utiliza três modelos de programação matemática, Programação Linear (PL), Programação Dinâmica (PD) e Melhor Rota (MR) – para maximizar a produtividade geral do caminhão por meio da manutenção e atualização de um modelo do equipamento da mina em tempo real, dos locais e das estradas de transporte. O sistema calcula continuamente as atribuições de caminhão otimizadas e as envia automaticamente aos operadores.

Dentre os recursos e benefícios do sistema *Dispatch* estão:

- Otimização total: Minimização das filas de caminhões e do tempo de suspensão da escavadeira para aumentar a eficiência e a produtividade do transporte;

- Módulo de abastecimento: Minimizar o enfileiramento nos locais de abastecimento e maximizar o tempo de funcionamento do equipamento;
- Módulo de estacionamento: Maximizar a produção e a eficiência no final de cada turno;
- Módulo de ações: Acionar automaticamente atribuições de ação quando os caminhões chegam ou partem de um local ou escavadeira;
- Funcionalidade de rastreamento do transporte: Coletar registros de produção para gerar relatórios precisos e feedback para o planejamento da mina;
- Módulo de blendagem: Automatizar a mistura em trituradores e pilhas de armazenamento, minimizando simultaneamente o tempo de espera do caminhão e da escavadeira.

É importante comentar que na realidade o despacho não consegue otimizar totalmente o sistema, pois existe a interferência humana. Os despachantes fazem constantes interferências para tentar corrigir imprevistos e restrições e isso afeta diretamente o funcionamento do otimizador.

2.6. SIMULAÇÃO

A simulação tem como base a pesquisa operacional e é muito utilizada atualmente, nas mais diversas áreas, na ajuda para a resolução de problemas e tomadas de decisão. Segundo RODRIGUES (2006) um modelo de simulação não resolve o problema, mas diz como um sistema vai operar sob um dado conjunto de parâmetros.

De acordo com CECILIANO (2007) um modelo de simulação envolve probabilidades e nos dá uma resolução próxima ao problema. A cada simulação tem-se respostas diferentes ao contrário dos modelos analíticos, onde as respostas são exatas e calculadas. Na maioria dos problemas reais não existe uma solução analítica e os dados são probabilísticos, não determinísticos. Nesse cenário vê-se a necessidade de um modelo computacional, próximo ao real, pois os resultados das possíveis ações são pouco previsíveis e muito difíceis de serem identificados analiticamente.

Segundo o mesmo autor a utilização de dados estatísticos históricos no modelo e as relações matemáticas ou lógicas de suas diversas etapas devem ser

realizadas para verificação de sua funcionalidade, cuja meta é chegar o mais próximo possível do real. Logo, a modelagem e a simulação são ferramentas adequadas, pois pode-se verificar os potenciais ganhos em cada possibilidade e os efeitos dessas relações.

Antes de executar uma nova operação ou processo, é necessário prever os possíveis resultados e consequências, para identificar pontos a serem melhorados, tendo em vista a otimização.

2.6.1. Simulação a eventos discretos

De acordo com SAKURADA & MIYAKE (2009) na simulação de eventos discretos o estado do sistema muda discretamente no tempo, não segue um padrão determinístico de entradas e saídas, mas aleatório, geralmente caracterizado por uma distribuição probabilística que melhor representa o fenômeno real estudado.

“A simulação de eventos discretos abrange o estudo de modelos de simulação cujas variáveis mudam de estado instantaneamente em pontos específicos de tempo, em contraste ao que ocorre com modelos contínuos, cujas variáveis podem mudar de estado continuamente no decorrer do tempo.” (SAKURADA & MIYAKE, 2009).

2.6.2. Simulação na indústria mineral

De acordo com PINTO e NETO (2004) os modelos para simulação das operações de lavra em minas ajudam a avaliar vários cenários, como os apresentados a seguir:

- Permitir ao engenheiro de minas ou administrador tirar conclusões sobre novos sistemas sem sua experimentação direta e/ou fazer mudanças ou testes de novas políticas nos sistemas já existentes sem perturbação da produção e sem implementá-los efetivamente;
- Melhorar a percepção geral da natureza de um processo, através da animação do sistema no computador;
- Identificar gargalos na produção;
- Estudar o dimensionamento e seleção de equipamentos utilizados nas operações da mina, como caminhões e equipamentos de carga;

- Determinar um local ótimo para o britador primário em relação à cava da mina.
- Testar a viabilidade de implantação de um sistema de alocação dinâmica de caminhões;
- Dimensionar a capacidade de silos, britadores e pilhas de estoque;
- Determinar o impacto, na produção da mina, do uso de um britador com descargas simultâneas de caminhões;
- Dimensionar sistemas para escoamento da produção usando trens e navios;
- Determinar a influência da disponibilidade de equipamentos e outros índices mecânicos, na produção da mina.

2.6.3. Delphos Open Pit Simulator®

O software Delphos Open Pit Simulador (DSIM) realiza simulações a eventos discretos para estimar a produção de um plano de lavra a partir de três elementos: layout da mina (rotas, pontos de carga e descarga), frota de equipamentos de carga e transporte e um plano de massa (quantidade de material que será retirada de cada frente de lavra e seu destino).

O DSIM foi criado pelo Laboratório de Planejamento de Mina que pertence a Universidade do Chile e faz parte do Centro Tecnológico de Mineração Avançada. O fluxo simplificado de trabalho no DSIM consiste em:

- Criação um projeto a partir de um arquivo em DXF contendo as rotas e a topografia ou somente a topografia (é possível desenhar as rotas manualmente no software);
- Verificação dos valores default utilizados no projeto;
- Importação das curvas de nível da topografia (opcional);
- Criação ou importação de rotas e correias transportadoras (opcional);
- Definição das frentes de lavra, locações e sinalização;
- Preencher as informações dos britadores (produtividade horária, MTBF e MTTR);
- Adicionar as especificações dos equipamentos de carga e transporte;
- Definição da compatibilidade entre os equipamentos de carga e os caminhões;
- Inserir as paradas programadas;

- Plano a ser simulado;
- Definição das frentes de carga e descarga;
- Inserir informações dos perfis de velocidade e consumo de combustível;
- Execução das simulações, dado o modelo computacional.

O software possibilita avaliar vários cenários, alterando-se os parâmetros operacionais de carregamento e transporte de uma mina a céu aberto. O input dos dados pode ser feito de maneira probabilística ou determinística. Após a simulação, o DSIM gera relatórios de distribuições de tempo, performance dos equipamentos e produtividade. Na figura 7 estão representados o layout das rotas e topografia.

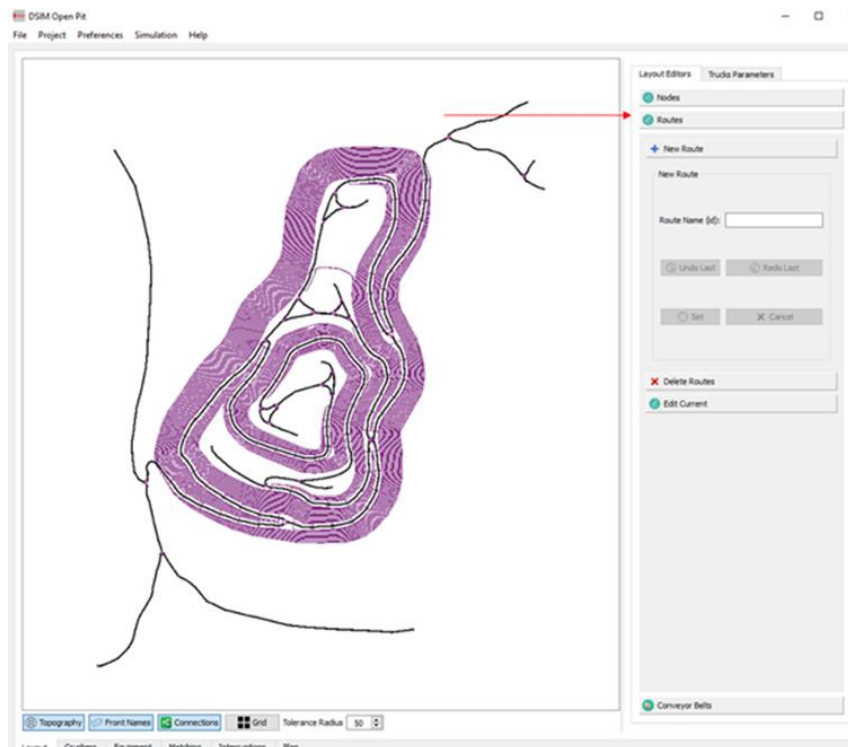


Figura 7: Layout das rotas e topografia no DSIm.
 Fonte: DSIm, 2019.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo foi discutido a metodologia empregada no trabalho bem como as condições de contorno que o tornaram possível. Tal metodologia pode ser dividida de acordo com a figura 8.

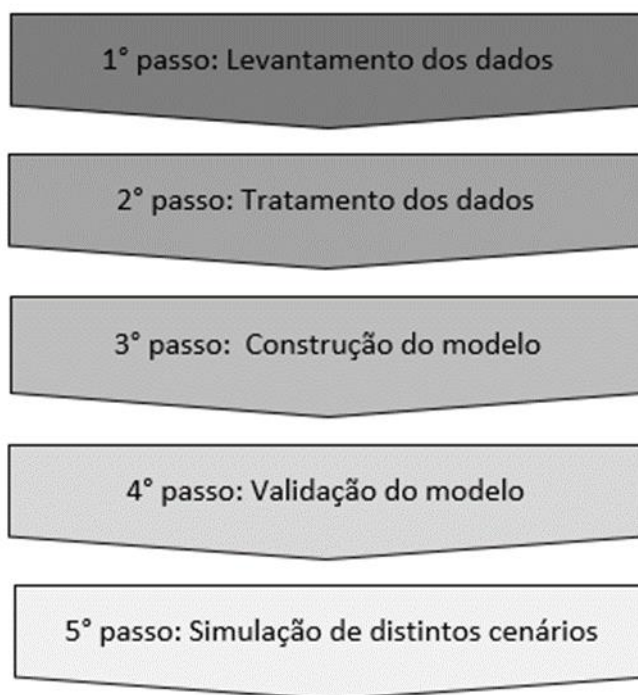


Figura 8: Metodologia do trabalho.
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.1. LEVANTAMENTO DOS DADOS

Os dados usados para a realização deste trabalho foram retirados do banco de dados do despacho de uma mina de minério de ferro real, localizada na região central de estado de Minas Gerais. Os dados foram organizados em uma planilha do Excel de modo a facilitar o levantamento das informações necessárias para a realização da simulação.

Os dados retirados da tabela e posteriormente tratados foram a carga média de transporte dos caminhões, as velocidades médias dos caminhões (carregado e vazio) e os tempos fixos (carregamento, basculamento e manobra). As perdas no processo por conta de algumas horas improdutivas (troca de turno e lanche) também foram consideradas.

3.2. TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados passaram por uma etapa de verificação. O intuito foi analisar a consistência dos mesmos a fim de detectar a existência de dados discrepantes ou

duplicados que possam ter sido originados de uma falha durante o processamento dos mesmos.

O DSIM versão acadêmica permite o input de dados de maneira probabilística por meio de uma distribuição de probabilidade ou por meio determinístico. Desse modo, foi utilizado o *Input Analyzer*, uma ferramenta do software ARENA simulator® versão estudante para encontrar a distribuição de probabilidade dos dados das capacidades dos caminhões. Apesar da capacidade nominal de um caminhão ser constante, na prática, podemos perceber que ocorrem desvios em torno da capacidade média. Tais desvios podem acarretarem erros significativos nos resultados da simulação, desse modo é importante achar uma distribuição de probabilidade.

A entrada dos seguintes dados ocorreu de maneira determinística:

- Índices de manutenção (MTBF e MTTR);
- Velocidades;
- Tempos de carregamento, manobra e basculamento.

3.3. CONSTRUÇÃO DO MODELO

O modelo computacional foi desenvolvido no software de simulação DSIM. Sendo assim, o ciclo de construção do modelo foi desenvolvido de acordo com o que o programa especifica (figura 9).

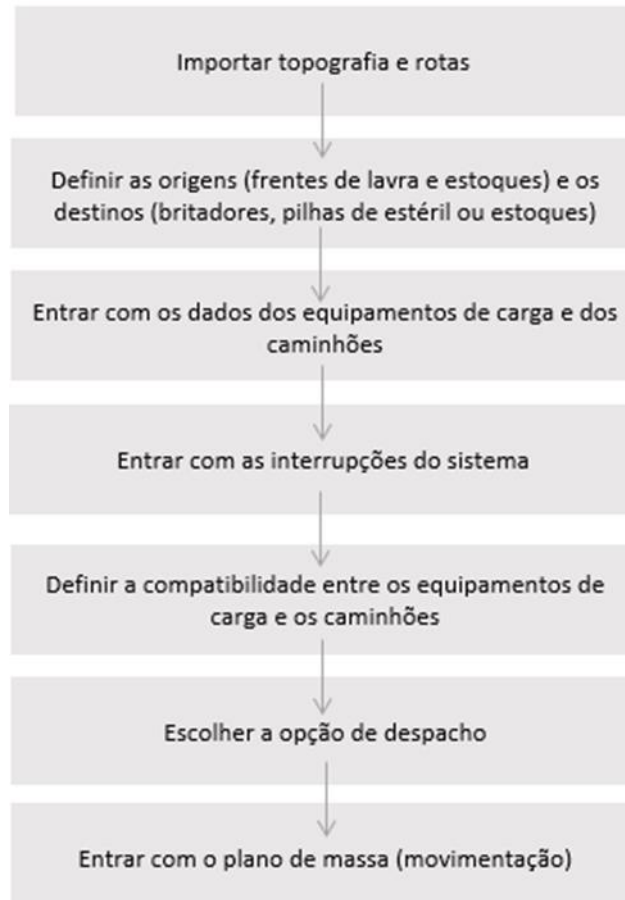


Figura 9: Fluxo de criação de um modelo no DSIM.
Fonte: Adaptado de DSIM, 2016.

Para a criação do modelo computacional é necessário entrar com os índices de manutenção MTBF e MTTR dos equipamentos. Além disso, a localização dos pontos de origem e destino do material, associar as frotas de equipamentos de carregamento às frentes e às frotas de caminhões e os principais tempos de perda do processo (troca de turno, lanche e abastecimento, pois ocorrem necessariamente).

Para finalizar o modelo, podemos inserir um plano de movimentação de massa ou deixá-lo em aberto, dependendo do objetivo do trabalho. Ao inserir um plano, podemos analisar a aderência ao plano comparando o plano de movimentação real com o plano de movimentação simulado.

3.4. VALIDAÇÃO DO MODELO

O modelo computacional real foi validado através da comparação dos resultados da simulação com os valores realizados naquele determinado dia. Para tal, foram simuladas 50 réplicas de 24 horas e analisadas as massas realizadas com as massas simuladas totais.

O plano de produção diário prevê uma movimentação de massa de aproximadamente 460.000 toneladas. Para validar o modelo, foi considerado uma variância de 5% em torno da massa movimentada no plano diário.

3.5. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

Após o modelo ser validado, podemos fazer alterações de modo a simular diversos cenários. O presente trabalho irá simular 4 cenários:

- I) Retirou-se do sistema 2 escavadeiras;
- II) Retirou-se do sistema 2 escavadeiras e 2 caminhões da frota 793 (240t);
- III) Retirou-se do sistema 2 escavadeiras e 4 caminhões da frota 793 (240t);
- IV) Retirou-se do sistema 2 escavadeiras e 4 caminhões, sendo 2 caminhões da frota 793 (240t) e 2 caminhões da frota 789 (190t).

4. ESTUDO DE CASO

Este capítulo tem como objetivo modelar os dados de entrada para simular 4 cenários e descrever as características da mina em estudo. A mina é operada 24 horas por dia durante todos os dias do ano e possui 4 turnos diários.

4.1. GENERALIDADES: CARACTERÍSTICAS DA MINA EM ESTUDO

A mina de minério de ferro está localizada no Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais e possui aproximadamente 15km de extensão. No dia simulado operou-se 6 britadores primários, 17 frentes de lavra, 14 estoques de minério (sendo tanto para basculamento quanto para retomada de minério) e 3 PDE's (pilha de estéril).

A lavra do minério começa a partir da perfuração e desmonte do material in situ e dependendo do seu tipo segue para diferentes destinos: se for minério segue para o britador ou para algum estoque e se for estéril segue para os PDE's. O lanche é feito na própria rota, não sendo necessário o deslocamento dos equipamentos, já a troca de turno é feita nos estacionamentos ou em locais específicos da rota. No modelo também foi contemplado o posto de abastecimento e a oficina de manutenção.

4.2. MODELAGEM DOS DADOS

O modelo conta com 17 equipamentos de carga e 53 caminhões, as especificações estão apresentadas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Especificações da frota de transporte.

FROTA DOS EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE				
Equipamento	Fabricante	Modelo	Nº de Equipamentos	Capacidade
Caminhão Convencional	Caterpillar	Cat 777	2	90t
Caminhão Convencional	Caterpillar	Cat 789	6	190t
Caminhão Convencional	Caterpillar	Cat 793	42	240t
Caminhão Convencional	Komatsu	830-E	3	240t
TOTAL			53	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Tabela 2: Especificações da frota de carga.

FROTA DOS EQUIPAMENTOS DE CARGA				
Equipamento	Fabricante	Modelo	Nº de Equipamentos	Capacidade da caçamba(t)
Escavadeira a Cabo	Bucyrus	ES295HR	3	45t
Escavadeira Hidráulica	Komatsu	ESPC5500	6	50t
Escavadeira Hidráulica	Komatsu	ESPC8000	1	78t
Escavadeira Hidráulica	Komatsu	PC2000	1	20t
Pá Carregadeira	LeTourneau	L1850	6	50t
TOTAL			17	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Da planilha Excel foram retiradas 2032 amostras para análise da carga média dos caminhões de cada uma das frotas. Foram utilizados o programa *Input Analyzer* e a distribuição de probabilidade encontrada para cada frota está na tabela 3.

Tabela 3: Distribuição de probabilidade das frotas de transporte.

FROTA	DISTRIBUIÇÃO	Nº DE AMOSTRAS
KOMATSU	NORMAL(251,12.4)	199
789	NORMAL(185,11.7)	250
793	169+101*(BETA(17.5,6.14))	1.533
777	88+GAMMA(329,0.151)	50
TOTAL		2.032

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

As velocidades foram imputadas de forma determinística com base nos dados históricos de cada frota do dia estudado. Os dados de manutenção (MTBF e MTTR) também foram imputados de forma determinística, uma vez que em todos os cenários foram feitas duas simulações: uma usando o MTBF e MTTR teórico (calculado pela manutenção) e outra usando o MTBF e MTTR real (valor realizado no dia estudado).

Nos cenários I, II, III e IV, retirou-se 2 escavadeiras, totalizando 15 equipamentos de carga no sistema. O plano de massa foi redefinido de forma que a massa dessas escavadeiras foi distribuída entre os outros equipamentos de

carga, não alterando o número de frentes de lavra nem a qualidade do material. Decidiu-se retirar essas 2 escavadeiras, pois estas estavam movimentando uma massa muito inferior da que era proposta no seu plano.

O número de caminhões não foi alterado no cenário I, porém no cenário II retirou-se 2 caminhões da frota 793, pois é a frota com maior número de equipamentos, resultando em 51 caminhões no sistema. Já no cenário III retirou-se 4 caminhões também da frota 793, totalizando 49 caminhões no sistema. Na última simulação (cenário IV) também foram retirados 4 caminhões, sendo 2 da frota 793 e 2 da frota 789, a fim de comparar o impacto gerado quando retira-se caminhões de capacidades distintas.

Para finalizar, o sistema de despacho utilizado em todas as simulações foi o que otimiza o fluxo de transporte, evitando a formação de filas, tanto no carregamento quanto no básculo, e envia caminhões para os equipamentos de carga que possuem maior prioridade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste capítulo são referentes aos dados gerados pelas simulações no software DSim. Todos os cenários foram simulados em um período de 24 horas com 50 réplicas.

Para validar o modelo foram encontradas algumas dificuldades como: limitações do software devido à complexidade do plano (grande número de equipamentos, origens e destinos), impossibilidade de imputar e prever todas as possíveis interferências no sistema e um tempo médio para cada simulação de 50 réplicas de uma hora e meia. Desta forma realizou-se vários testes para conseguir chegar ao cenário mais próximo da realidade, observando a movimentação total, tempos de fila, ociosidade e velocidade global. A massa movimentada total foi de 437.000 toneladas, representando 95% da massa do plano original.

É importante destacar que para as análises feitas, utilizou-se os cenários que tiveram os melhores resultados.

Os dados do modelo validado são mostrados na tabela 4, comparando o cenário simulado com MTBF e MTTR reais e o cenário simulado com MTBF e MTTR teóricos, observa-se uma diferença de -0,6% na Média de Ociosidade, -2,3% na massa da movimentação total, -48 segundos na média da fila de basculo. A velocidade global teve uma pequena perda na ordem de 0,1 Km/h e a Média da fila de carregamento manteve-se estável.

Tabela 4: Comparação do cenário base usando o MTBF e MTTR teórico e real.

CENÁRIO DE VALIDAÇÃO DO MODELO (cenário base)	MTBF e MTTR TEÓRICO	MTBF e MTTR REAL
MÉDIA DA OCIOSIDADE (%)	19,19%	18,55%
MOVIMENTAÇÃO TOTAL(t)	446.990	436.596
MÉDIA FILA BASCULO (min)	4,6	3,8
MÉDIA FILA CARREGAMENTO (min)	2,0	2,0
VELOCIDADE GLOBAL (Km/h)	24,3	24,2
Nº ESCAVADEIRAS/PÁS	17	17
Nº CAMINHÕES	53	53

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Após a validação do modelo foram simulados mais 4 cenários para tentar diminuir a ociosidade dos equipamentos de carga. Na tentativa de abaixar os custos operacionais e como consequência aumento da produtividade.

A primeira análise feita foi comparar o cenário base com o cenário I (ambos utilizando os valores de MTBF e MTTR reais). O cenário I foi escolhido para a comparação, pois tinha a menor Média de Ociosidade dos 4 cenários simulados, 15,58%. Os valores das 2 simulações estão na tabela 5 e nota-se uma redução de 3% na média da ociosidade, redução de 8% da massa na Movimentação Total, aumento de 36 segundos na média da fila de basculo, redução de 12 segundos na média da fila de carregamento, uma pequena redução da velocidade global em 0,2 Km/h e 2 escavadeiras a menos.

Tabela 5: Comparação entre o cenário base e o cenário I.

	VALIDAÇÃO DO MODELO (cenário base)	MENOS 2 ESCAVADEIRAS (cenário I)	COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS
	MTBF e MTTR REAL	MTBF e MTTR REAL	
MÉDIA DA OCIOSIDADE (%)	18,55%	15,58%	-3%
MOVIMENTAÇÃO TOTAL(t)	436.596	402.646	-8%
MÉDIA FILA BASCULO (min)	3,8	4,4	36 seg
MÉDIA FILA CARREGAMENTO (min)	2,0	1,8	-12 seg
VELOCIDADE GLOBAL (Km/h)	24,2	23,9	-0,2
N° ESCAVADEIRAS/PÁS	17	15	-2
N° CAMINHÕES	53	53	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Analisando a ociosidade por equipamento, observa-se que essa foi mais impactada nas escavadeiras (EC3301, EC3304, EM2008, EM2466, EM2967, EM2968, EM2969, EM2970 e EM2971) do que nas pás carregadeiras (PE3781, PE3782, PE3783, PE3784, PE3385 e PE3788). Nota-se que nos equipamentos: EM2008, EM2466, EM2967, EM2968, EM2969, EM2970, EM2971 e PE3784 a ociosidade diminuiu 2,34%, 7,78%, 9,18%, 2,37%, 5,46%, 0,07%, 0,37%, respectivamente (figura 10).

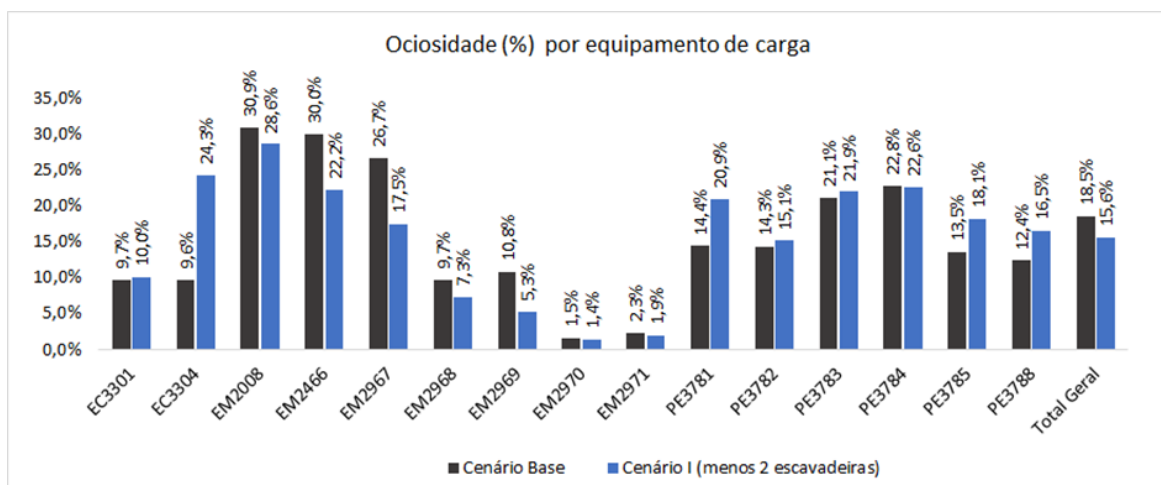


Figura 60: Comparação da ociosidade dos equipamentos de carga no cenário base e no cenário I.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Além da redução na média da ociosidade, no cenário I há a possibilidade de reduzir os seguintes custos:

- Manutenção preventiva e corretiva de 2 escavadeiras;
- Operadores para 2 escavadeiras;
- Aquisição de 2 escavadeiras.

A segunda análise feita foi a comparação dos resultados quando se altera o MTBF e MTTR teórico pelo real. Utilizou-se o cenário (III), pois neste cenário foram retirados o maior número de equipamentos, 2 escavadeiras e 4 caminhões da maior frota 793.

Na tabela 6 é possível observar que quando se usa o MTBF e MTTT teóricos, ou seja, quando se tem confiabilidade dos equipamentos, é possível melhorar as operações da mina. Usando o MTBF e MTTR teóricos conseguiu-se movimentar aproximadamente, 21000 toneladas a mais, com uma média de ociosidade 1,3% menor, uma redução de 6 segundos tanto na média da fila de basculo com na média da fila de carregamento e aumento de 0,5 Km/h na velocidade global.

Tabela 6: Comparação entre o MTBF e MTTR teórico e real no cenário III.

MENOS 2 ESCAVADEIRAS 4 CAMINHÕES 793 (cenário III)	MTBF e MTTR TEÓRICO	MTBF e MTTR REAL	COMPARAÇÃO
OCIOSIDADE (%)	19,64%	20,91%	1,3%
MOVIMENTAÇÃO (t)	426.947	405.389	-21.558
FILA BASCULO (min)	3,6	3,7	6 seg
FILA CARREGAMENTO (min)	1,8	1,7	6 seg
VELOCIDADE GLOBAL (Km/h)	24,07	23,56	-0,5
Nº ESCAVADEIRAS/PÁS	15	15	
Nº CAMINHÕES	49	49	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Mantendo o mesmo raciocínio foram analisadas as horas de atividade de cada equipamento de carga, segundo a legenda dos gráficos abaixo, figuras 11 e 12:

- Demora é o tempo de manobra do caminhão para ser carregado pelo equipamento de carga;
- Efetivo são as horas trabalhadas do equipamento;
- Fora de serviço são as horas de falha ou manutenções corretivas e as manutenções programadas ou preventivas;
- Perda operacional são os tempos de fila, ociosidade e paradas;
- Reserva é a soma das reservas programadas (lanche, troca de turno e abastecimento) e das reservas não programadas (quando o equipamento já cumpriu a massa do seu plano e fica parado em reserva).

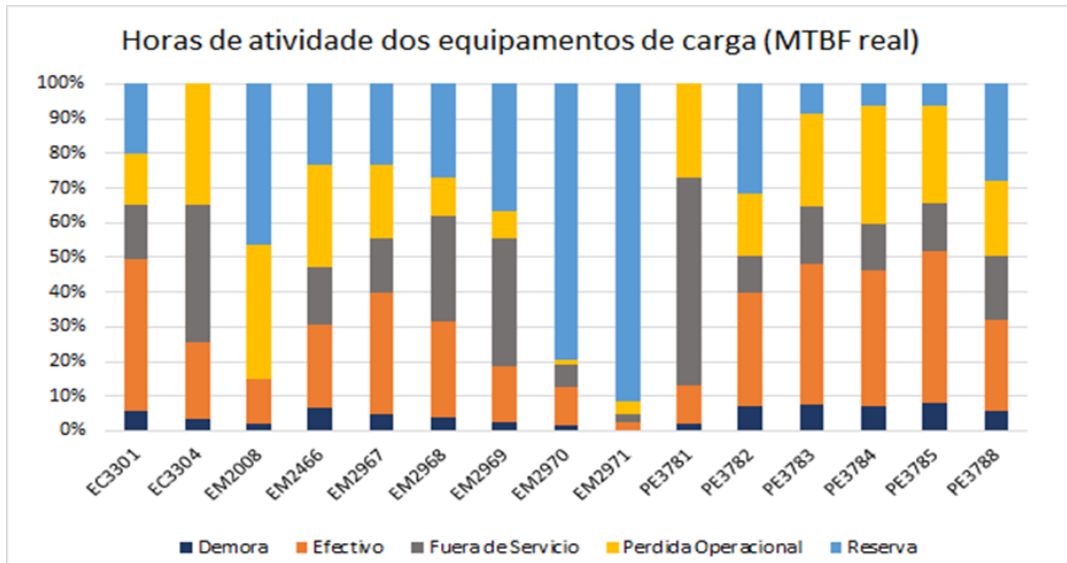


Figura 11: Horas de atividade dos equipamentos de carga do cenário III com MTBF e MTTR reais.

Fonte: DSIM, 2019.

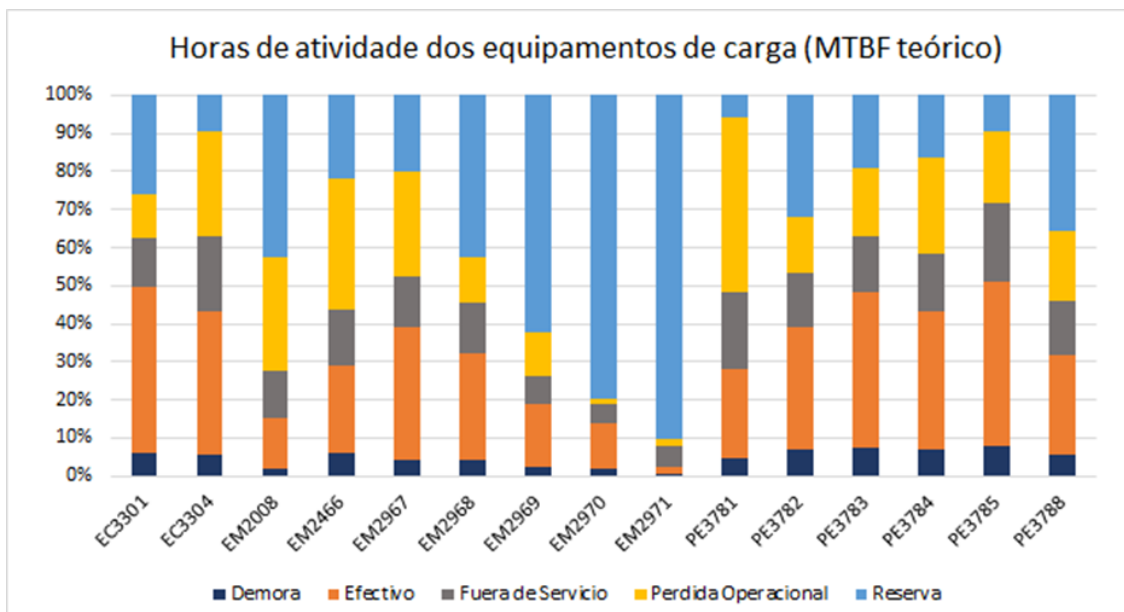


Figura 12: Horas de atividade dos equipamentos de carga do cenário III com MTBF e MTTR teóricos.

Fonte: DSIM, 2019.

Observa-se que utilizando o MTBF e MTTR teóricos na simulação, a média do tempo efetivo aumenta de 25,9% para 27,6%, a média do tempo fora de serviço diminuiu de 19,8% para 13,6% e a perda operacional também diminuiu de 21,2% para 19,9%. A média do tempo de reserva aumentou de 28,6% para 34,2%, pois um equipamento que tem menos falhas ou manutenções corretivas tem mais horas trabalhadas sem interrupções e com isso termina seu plano mais rápido.

Nas figuras 11 e 12 é possível observar que as escavadeiras EC3304, EM2968, EM2969 e a pá carregadeira PE3781 tiveram uma redução significativa das horas fora de serviço.

Outro ponto observado foi o aumento de 13952 na massa movimentada da escavadeira EC3304 e 13816 na pá mecânica PE3781 (figura 13), dois dos equipamentos que mais tiveram redução da hora fora de serviço.

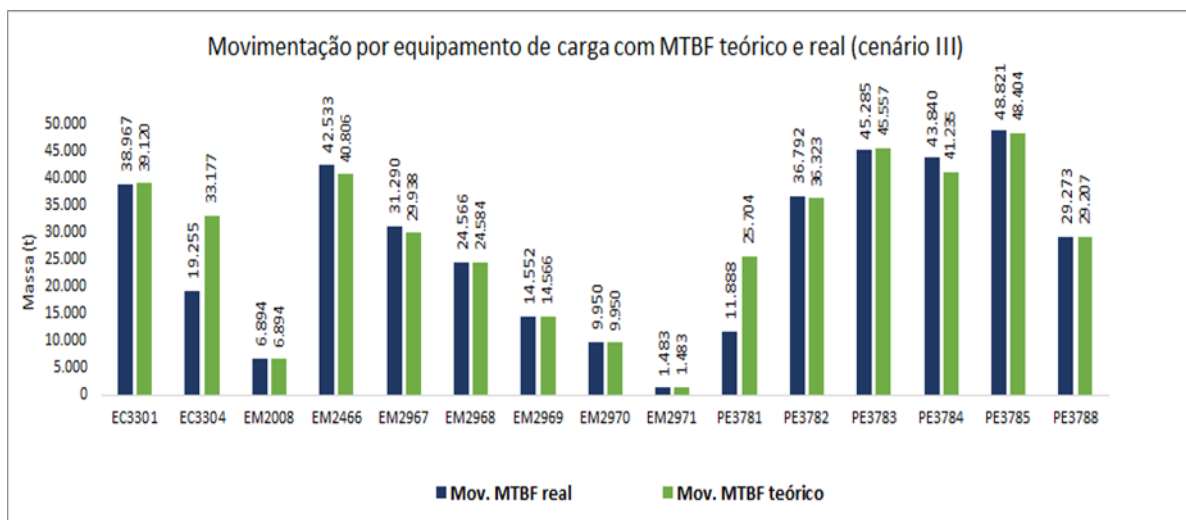


Figura 13: Movimentação por equipamento de carga do cenário III comparando o MTBF e MTTR reais e teóricos.

Fonte: DSIM, 2019.

Da mesma forma, analisando agora os equipamentos de transporte é possível observar nas figuras 14 e 15, que na simulação utilizando o MTBF e MTTR teóricos diminui-se as horas fora de serviço de alguns equipamentos, fazendo com que a disponibilidade física (DF) dos equipamentos seja maior e mais uniforme. Dessa forma a efetividade da operação de transporte pode aumentar.

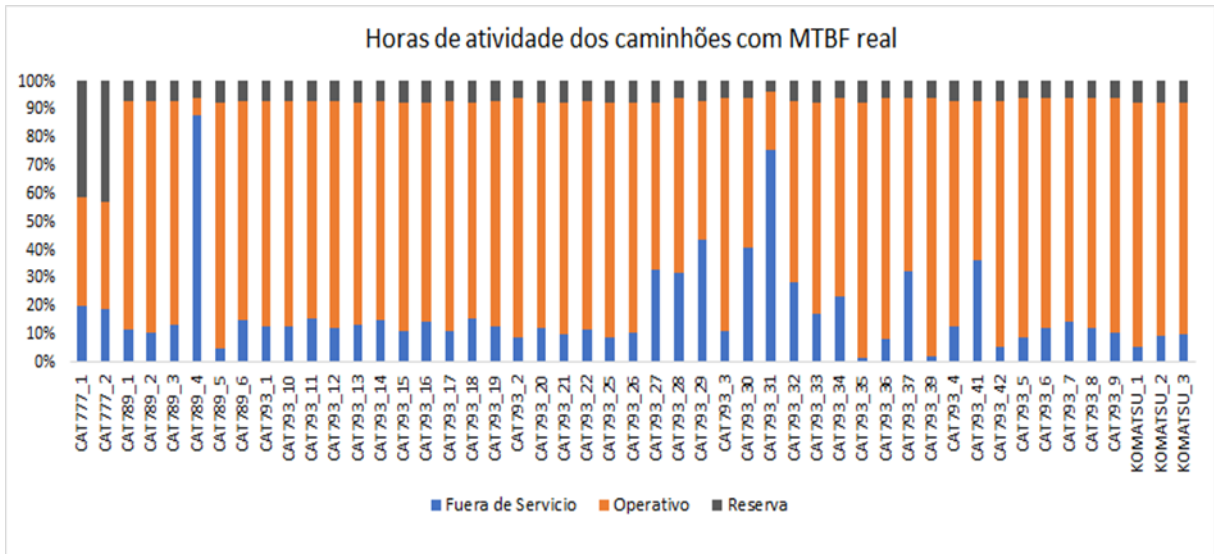


Figura 14: Horas de atividade dos caminhões com MTBF e MTTR reais.
Fonte: DSIM, 2019.

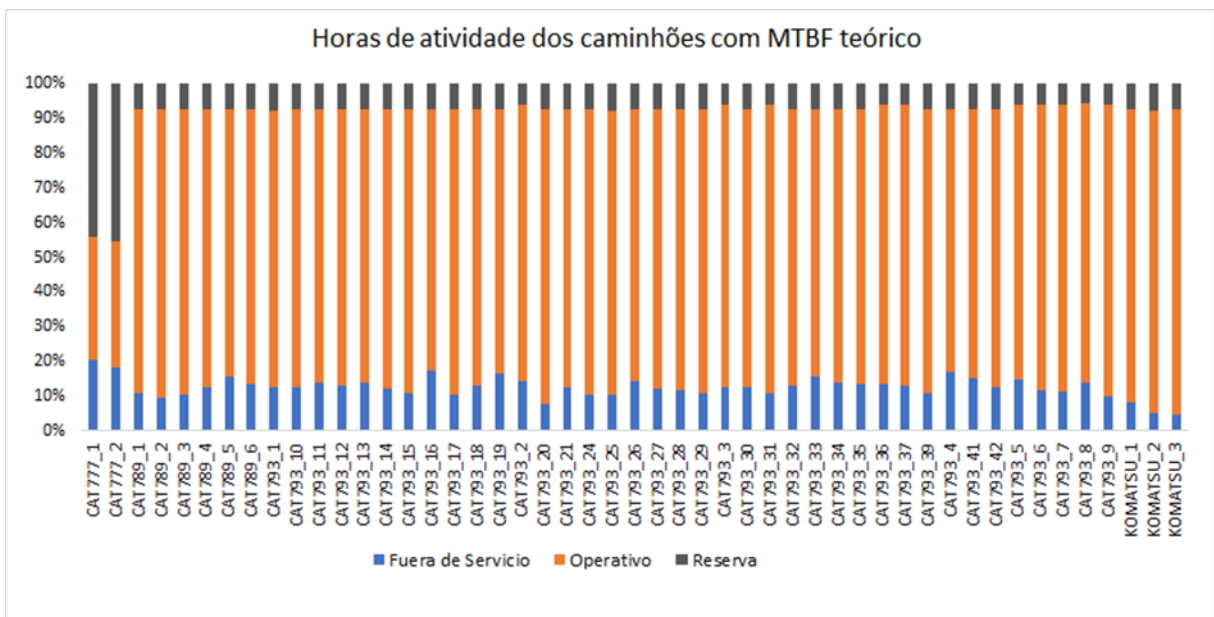


Figura 157: Horas de atividade de caminhões com MTBF e MTTR teóricos.
Fonte: DSIM, 2019.

Por fim, analisou-se a produtividade horária do dia simulado, e pela figura 16 observa-se, que utilizando o MTBF e MTTR teóricos pode-se aumentar, em geral, a massa movimentada por hora.

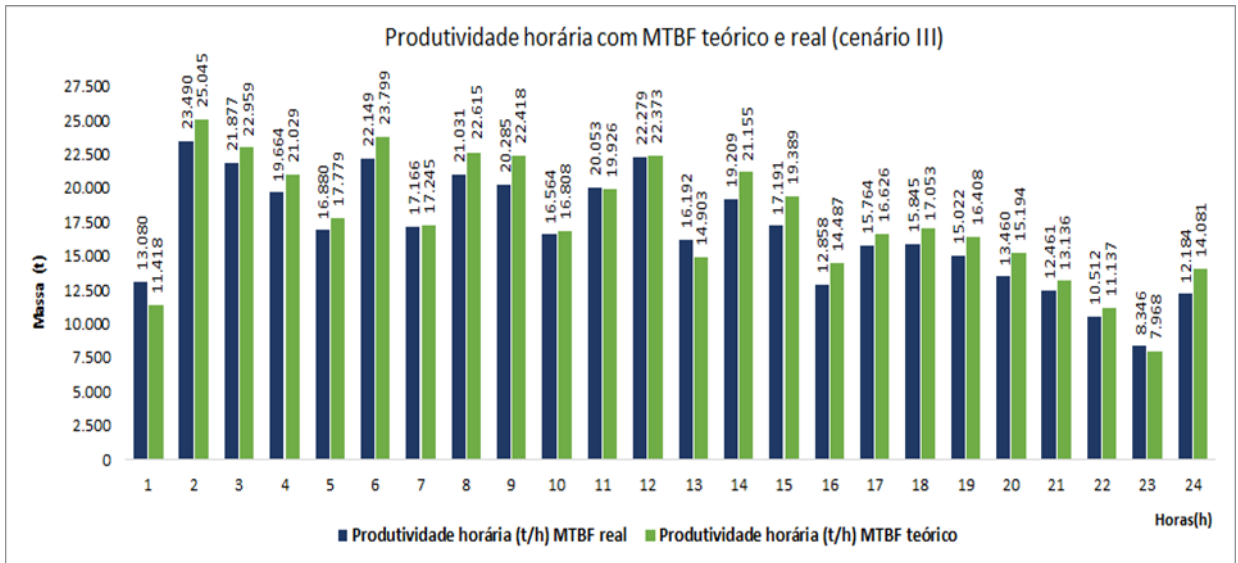


Figura 16: Comparação da produtividade horária no cenário III utilizando o MTBF e MTTR reais e teóricos.

Fonte: DSIM, 2019.

6. CONCLUSÕES

Considerando que o objetivo principal do trabalho foi buscar possíveis melhorias em uma operação real de carregamento e transporte, pode-se dizer que o resultado foi satisfatório pois a massa movimentada total foi 95% aderente ao plano real.

Fazer a simulação em um software operacional, como o DSIM, mesmo que esteja em fase de desenvolvimento, permitiu analisar dados e situações complexas de uma forma mais simples. Os outputs são gerados em formato de gráficos e tabelas, podendo ser manipulados de forma a identificar as perdas e ganhos em cada cenário simulado.

Neste estudo foi possível observar que garantindo os valores teóricos do MTBF e MTTR dos equipamentos (cenário III), pode-se ter um aumento na movimentação, velocidade e uma diminuição nos tempos de fila e ociosidade dentro das operações de carregamento e transporte. Contudo, é necessário um estudo mais aprofundado, levando em consideração outras possíveis variáveis, como a mudança inesperada na qualidade do minério e a interferência física de outros equipamentos da mina (equipamentos de terraplanagem e veículos leves) na rota dos caminhões, entre outros.

Outra questão observada foi que a falta de confiabilidade dos equipamentos, pode fazer com que ocorra um superdimensionamento, e que existam no sistema mais equipamentos do que o necessário para tentar cumprir a massa movimentada. O excesso de equipamentos pode gerar um aumento da ociosidade dos mesmos e gastos desnecessários para a empresa.

A média de ociosidade real da mina estudada está em torno de 30% a 35%, e é possível concluir que ela pode ser diminuída, pois todos os cenários simulados tiveram a ociosidade na faixa de 15% a 21%, significativamente menores. Em qualquer simulação serão encontrados perdas e ganhos que deverão ser avaliadas.

Como sugestão para trabalhos futuros é importante realizar simulações que consigam levar em consideração mais interferências externas, como: outros equipamentos que trabalham na mesma via dos caminhões e o fluxo de caminhões permitidos em um determinado trecho. Além de uma análise econômica para avaliar a viabilidade dos cenários de tiveram a retirada de equipamentos.

REFERÊNCIAS

CATERPILLAR. **Produtos**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment.html> Acesso em: 11 abril de 2019.

CECILIANO, W. R. A. **Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

COSTA, F. P. **Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral Ouro Preto, 2005.

DELPHOS. **Manual do DSIM Open Pit v1.2. 2016**. Disponível em: <<http://delphoslab.cl/index.php/software-es/manuales/99-dsim-open-pit>>. Acesso em: 29 de março de 2019.

GOOGLE. **Caminhão rodoviário**. Disponível em:<<https://intrucktransporte.wordpress.com/2013/06/05/mineradora-destaca-vantagens-do-scania-na-configuracao-10x46/>> Acesso em: 11 de abril de 2019.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. McGraw Hill Brasil, 2013.

JIMENO, C.L. **Manual de transporte con volquetes y diseño de pistas mineras**. ETSI Minas, Universidad Politécnica de Madrid, 2014.

KOMATSU. **Mineração de superfície: Carregadeira de rodas**. Disponível em: <<https://mining.komatsu/pt/minera%C3%A7%C3%A3o-de-superf%C3%ADcie/carregadeiras-de-rodas>> Acesso em: 11 de abril de 2019.

MODULAR MINING. **Soluções de carga e transporte**. Disponível em <<https://www.modularmining.com/pt-br/nossas-solucoes/solucoes-de-carga-e-transporte/>> Acesso em: 5 de abril de 2019.

QUEVEDO, J. M. G. **Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2009.

RAMOS, A. N. e PINTO, Luiz Ricardo. Revista Escola de Minas. **Template do Programa Arena para simulação das operações de carregamento e transporte em minas a céu aberto**. Ouro Preto; v.57-n.1-p.1-72-jan.mar.2004

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual prático de escavação: terraplenagem e escavação de rocha**. 3. ed. São Paulo: Editora Pini, 2007.

RODRIGUES, L. F. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto**. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção; 2006.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I. **Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços**. *Gestão & Produção*, v. 16, n. 1, p. 25-43, 2009.

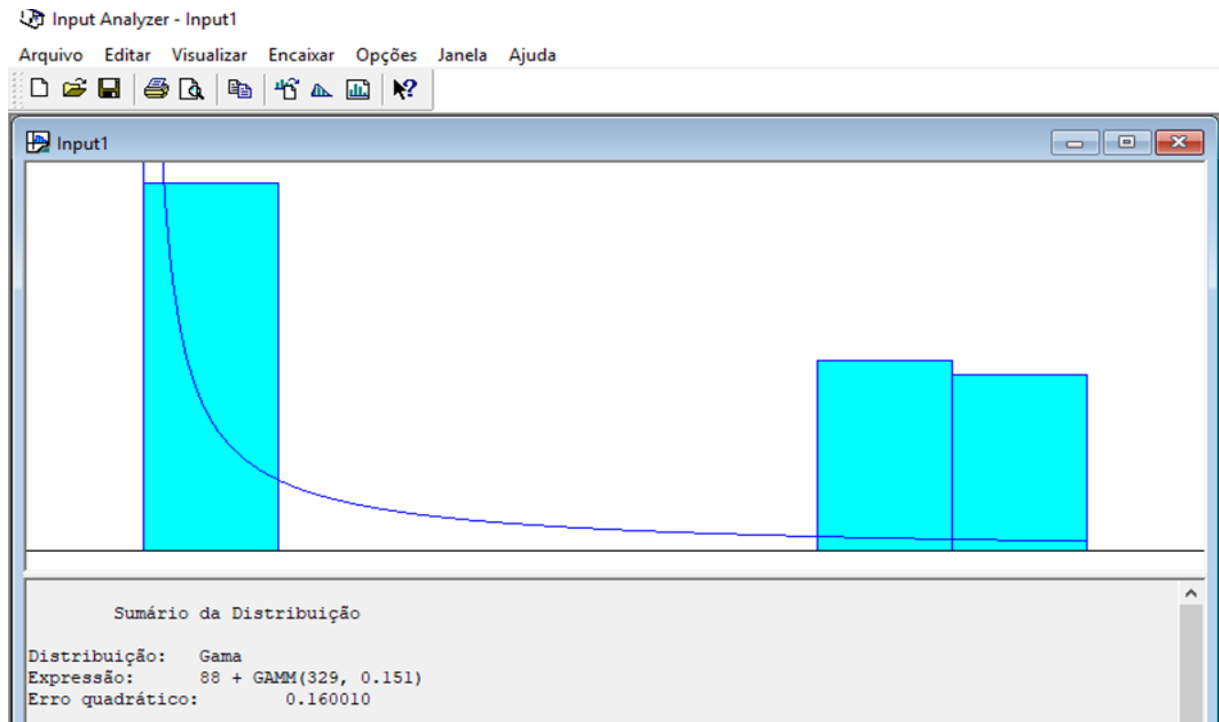
SILVA, V. C., **Apostila de carregamento e transporte de rochas**. Ouro Preto: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

SOUZA, J. C. **Apostila de métodos de lavra a céu aberto**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2001.

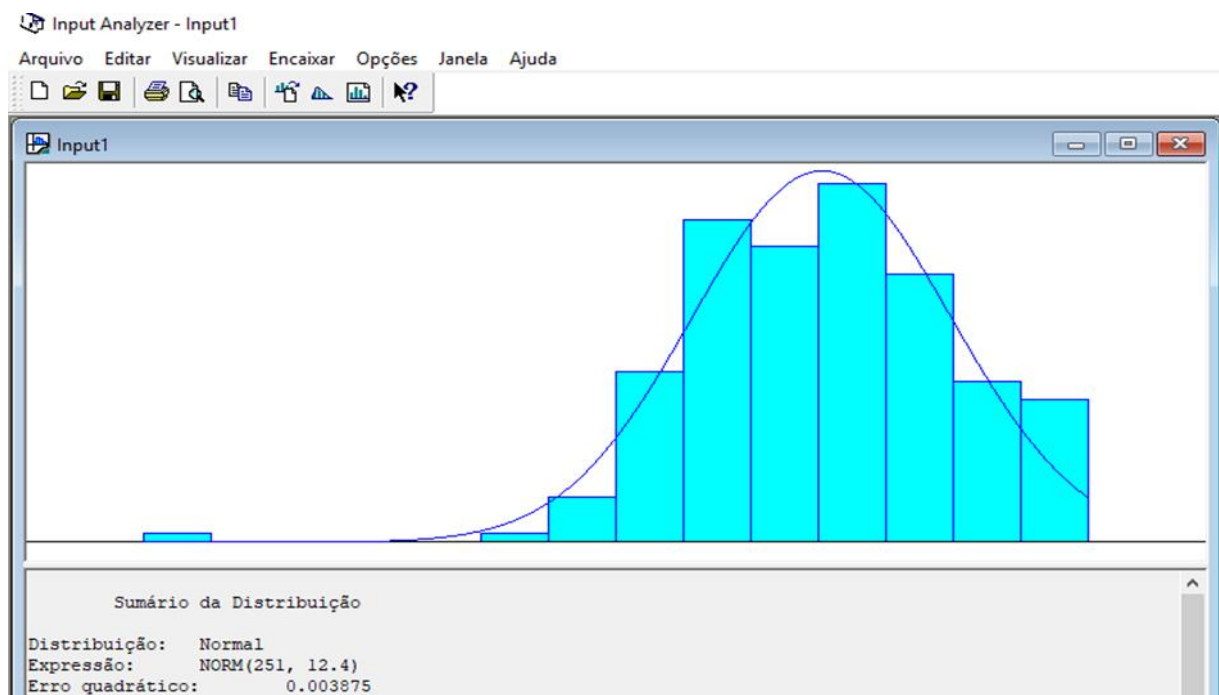
ANEXOS I

Gráficos da distribuição probabilística da carga média de cada frota de caminhões gerados pelo programa *Input Analyzer*.

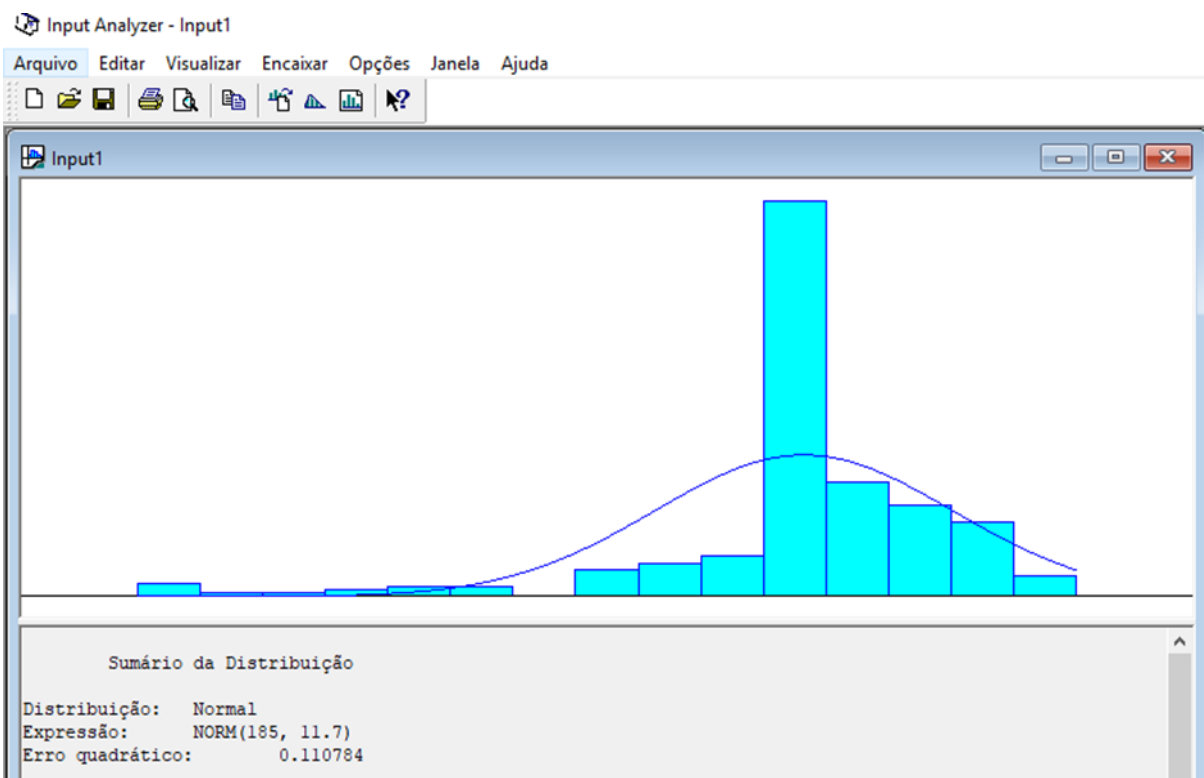
Anexo 1: Distribuição probabilística da carga média da frota 777



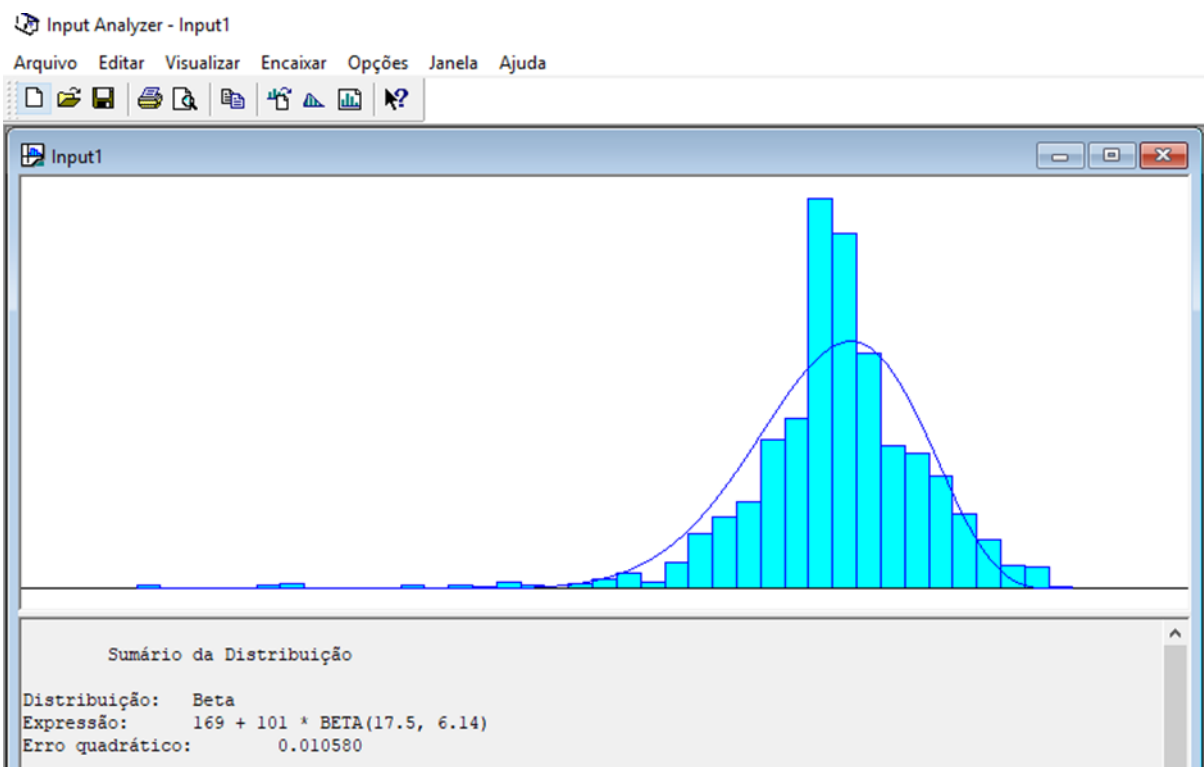
Anexo 2: Distribuição probabilística da carga média da frota KOMATSU.



Anexo 3: Distribuição probabilística da carga média da frota 789.



Anexo 4: Distribuição probabilística da carga média da frota 793.



ANEXOS II

Tabelas mostrando os resultados de todos os cenários simulados e os valores do MTBF e MTTR reais e teóricos de cada equipamento de carga e transporte.

Anexo 4: Resultados da simulação do cenário I.

MENOS 2 ESCAVADEIRAS (cenário I)	MTBF e MTTR TEÓRICO	MTBF e MTTR REAL
MÉDIA DA OCIOSIDADE (%)	17,07%	15,58%
MOVIMENTAÇÃO TOTAL(t)	439.823	402.646
MÉDIA FILA BASCULO (min)	4,4	4,4
MÉDIA FILA CARREGAMENTO (min)	1,7	1,8
VELOCIDADE GLOBAL (Km/h)	24,0	23,9
Nº ESCAVADEIRAS/PÁS	15	15
Nº CAMINHÕES	53	53

Anexo 5: Resultados da simulação do cenário II.

MENOS 2 ESCAVADEIRAS E 2 CAMINHÕES 793 (cenário II)	MTBF e MTTR TEÓRICO	MTBF e MTTR REAL
MÉDIA DA OCIOSIDADE (%)	18,17%	18,86%
MOVIMENTAÇÃO TOTAL(t)	433.538	409.547
MÉDIA FILA BASCULO (min)	4,2	4,5
MÉDIA FILA CARREGAMENTO (min)	1,8	1,8
VELOCIDADE GLOBAL (Km/h)	24,2	23,6
Nº ESCAVADEIRAS/PÁS	15	15
Nº CAMINHÕES	51	51

Anexo 6: Resultados da simulação do cenário III.

MENOS 2 ESCAVADEIRAS 4 CAMINHÕES 793 (cenário III)	MTBF e MTTR TEÓRICO	MTBF e MTTR REAL
MÉDIA DA OCIOSIDADE (%)	19,64%	20,91%
MOVIMENTAÇÃO TOTAL(t)	426.947	405.389
MÉDIA FILA BASCULO (min)	3,6	3,7
MÉDIA FILA CARREGAMENTO (min)	1,8	1,7
VELOCIDADE GLOBAL (Km/h)	24,1	23,6
Nº ESCAVADEIRAS/PÁS	15	15
Nº CAMINHÕES	49	49

Anexo 7: Resultados da simulação do cenário IV.

MENOS 2 ESCAVADEIRAS E 4 CAMINHÕES, SENDO (2) 793 E (2) 789 (cenário IV)	MTBF e MTTR TEÓRICO	MTBF e MTTR REAL
MÉDIA DA OCIOSIDADE (%)	19,78%	20,36%
MOVIMENTAÇÃO TOTAL(t)	429.447	404.807
MÉDIA FILA BASCULO (min)	3,6	4,1
MÉDIA FILA CARREGAMENTO (min)	1,8	1,8
VELOCIDADE GLOBAL (Km/h)	24,0	23,6
Nº ESCAVADEIRAS/PÁS	15	15
Nº CAMINHÕES	49	49

Anexo 8: Valores dos MTBF e MTTR teóricos e reais de cada equipamento de carga.

VALORES DE MTBF E MTTR

REALIZADOS EM HORAS

ESC	MTBF	MTTR
EC3301	43,3	10,8
EC3303	43,3	10,8
EC3304	13,5	9,4
EM2008	8,1	1,3
EM2466	17,8	4,6
EM2967	33,9	7,0
EM2968	12,4	8,9
EM2969	9,0	12,8
EM2970	33,9	7,0
EM2971	33,9	7,0
EM2972	33,9	7,0
PE3781	6,7	9,9
PE3782	57,6	11,1
PE3783	57,6	11,1
PE3784	57,6	11,1
PE3785	57,6	11,1
PE3788	10,5	3,4

VALORES DE MTBF E MTTR

TEÓRICO EM HORAS

ESC	MTBF	MTTR
EC3301	43,3	10,8
EC3303	43,3	10,8
EC3304	43,3	10,8
EM2008	36,5	6,7
EM2466	36,5	6,7
EM2967	33,9	7,0
EM2968	33,9	7,0
EM2969	33,9	7,0
EM2970	33,9	7,0
EM2971	33,9	7,0
EM2972	33,9	7,0
PE3781	57,6	11,1
PE3782	57,6	11,1
PE3783	57,6	11,1
PE3784	57,6	11,1
PE3785	57,6	11,1
PE3788	57,6	11,1

Anexo 9: Valores dos MTBF e MTTR teóricos e reais de cada equipamento de transporte.

VALORES DE MTBF E MTTR REALIZADOS				VALORES DE MTBF E MTTR TEÓRICO			
	Caminhão	MTBF	MTTR	Caminhão	MTBF	MTTR	
793	CA65778	55,7	8,2	CA65778	55,7	8,2	
	CA65781	55,7	8,2	CA65781	55,7	8,2	
	CA65785	55,7	8,2	CA65785	55,7	8,2	
	CA65786	55,7	8,2	CA65786	55,7	8,2	
	CA65789	55,7	8,2	CA65789	55,7	8,2	
	CA65791	55,7	8,2	CA65791	55,7	8,2	
	CA65792	55,7	8,2	CA65792	55,7	8,2	
	CA65793	55,7	8,2	CA65793	55,7	8,2	
	CA65794	7,0	3,6	CA65794	55,7	8,2	
	CA65902	7,2	3,4	CA65902	55,7	8,2	
	CA65903	55,7	8,2	CA65903	55,7	8,2	
	CA65904	55,7	8,2	CA65904	55,7	8,2	
	CA65905	2,8	2,3	CA65905	55,7	8,2	
	CA65906	4,1	2,9	CA65906	55,7	8,2	
	CA65908	5,4	17,8	CA65908	55,7	8,2	
	CA65910	55,7	8,2	CA65910	55,7	8,2	
	CA65911	15,5	6,2	CA65911	55,7	8,2	
	CA65913	55,7	8,2	CA65913	55,7	8,2	
	CA65914	55,7	8,2	CA65914	55,7	8,2	
	CA65915	55,7	8,2	CA65915	55,7	8,2	
	CA65916	55,7	8,2	CA65916	55,7	8,2	
	CA65917	17,1	2,4	CA65917	55,7	8,2	
	CA65918	55,7	8,2	CA65918	55,7	8,2	
	CA65919	6,2	2,0	CA65919	55,7	8,2	
	CA65920	17,2	0,1	CA65920	55,7	8,2	
	CA65921	55,7	8,2	CA65921	55,7	8,2	
	CA65922	55,7	8,2	CA65922	55,7	8,2	
	CA65924	55,7	8,2	CA65924	55,7	8,2	
	CA65925	55,7	8,2	CA65925	55,7	8,2	
	CA65926	55,7	8,2	CA65926	55,7	8,2	
	CA65927	55,7	8,2	CA65927	55,7	8,2	
	CA65928	55,7	8,2	CA65928	55,7	8,2	
CA65929	17,6	0,3	CA65929	55,7	8,2		
CA65931	18,5	1,8	CA65931	55,7	8,2		
CA65932	7,1	3,5	CA65932	55,7	8,2		
CA65933	0,0	0,0	CA65933	55,7	8,2		
CA65934	55,7	8,2	CA65934	55,7	8,2		
CA65935	8,1	1,4	CA65935	55,7	8,2		
CA65936	20,2	0,4	CA65936	55,7	8,2		
CA65937	55,7	8,2	CA65937	55,7	8,2		
CA65941	55,7	8,2	CA65941	55,7	8,2		
CA65942	13,2	4,1	CA65942	55,7	8,2		
789	CA66521	48,6	7,2	CA66521	48,6	7,2	
	CA66522	1,2	9,4	CA66522	48,6	7,2	
	CA66523	48,6	7,2	CA66523	48,6	7,2	
	CA66527	48,6	7,2	CA66527	48,6	7,2	
	CA66528	19,9	1,1	CA66528	48,6	7,2	
	CA66529	17,8	3,2	CA66529	48,6	7,2	
777	CA67101	63,8	12,7	CA67101	63,8	12,7	
	CA67102	63,8	12,7	CA67102	63,8	12,7	
KOMATSU	CE57820	19,8	2,1	CE57820	127,7	7,4	
	CE57821	18,2	2,3	CE57821	127,7	7,4	
	CE57822	127,7	7,4	CE57822	127,7	7,4	